

температурах и получены образцы твердого и жидкого продуктов регенерации. Длительность отдельного опыта определялась количеством твёрдого и жидкого продукта, которое должно было быть достаточным для анализа его свойств. Приводятся примеры использования полученного порошка.

В настоящее время прорабатывается плазмохимическая схема процесса регенерации отработанных фторсодержащих растворов титановых, стекольных и рудо перерабатываемых производств, с возвратом регенерированной кислоты.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0028.

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИРОДНЫХ ГЛИН КАК БАРЬЕРОВ ДЛЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАО

В.Ф. Мышкин, Ван Цайлунь, И.В. Туксов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

Е-mail: [caylun1224@gmail.com](mailto:caylun1224@gmail.com)

Развитие атомной энергетики приводит к накоплению значительных количеств радиоактивных отходов (РАО). Потенциальная опасность актинидов сохраняется сотни тысяч лет. Для локализации РАО необходима разработка эффективных и экологически безопасных методов. Общеизвестно, что эффективным способом обращения с такими отходами является размещение их в геологических формациях, содержащих глины. Цель исследования – оценка коэффициентов диффузии различных катионов в глинистых минералах, используемых как барьер для локализации РАО.

Распространение РАО связано с диффузией радионуклидов в глине и в порах, а также переносом с помощью потоков воды. Установлено, что при плотности более  $1,5 \text{ г/м}^3$  глинистые минералы практически не проницаемы для воды [1]. Большая часть радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , изотопы Pu и U) сорбируется на глине за счёт обмена ионами. Скорость ионного обмена зависит от термодинамики обмена, состава и концентрации раствора, от сорбируемых ионов и ионной формы глины. Более эффективно обмен катионов происходит из нейтральных растворов [2]. Это связано с тем, что ионы металлов не конкурируют с  $\text{H}^+$  за активные центры.

Для оценки величины коэффициента диффузии катионов радионуклидов внутри кристаллитов иллита оценивали энергию связи межслоевых ионов с минералом с помощью программы для квантово-химических расчетов Materials Studio. В таблице приведены энергии кулоновской связи минерала иллита с ионами металлов. Известно, что координационные числа зависят от ионных радиусов. Координационные числа указаны в скобках, а радиусы приведены в ангстремах. Чем больше ионный радиус, тем на большее расстояние раздвигаются два соседних слоя атомов минерала, а суммарная энергия связи расчетной ячейки уменьшается. Максимальная энергия связи наблюдается для иона  $\text{Na}^+$ .

Таблица 1

ион	Li	Na	K	Rb	Cs	Fr	Sr	Ra
энергия связи, кэВ	-23,930	-28,390	-26,293	-25,813	-25,374	-25,290	-26,515	-25,819
ионный радиус, Å	1,06 (8)	1,32 (8)	1,65 (8)	1,75 (8)	1,88 (8)	1,94 (6)	1,40 (8)	1,62 (8)

Видно, что с увеличением радиуса катионов щелочных элементов энергия связи уменьшается.

Однако, литий выпадает из этой закономерности. Во втором периоде также наблюдается координация между энергией связи и ионного радиуса. Энергия, необходимая для преодоления ионом барьера в элементарной ячейке иллита связана с ионным радиусом. В докладе приводится анализ процессов, приводящих к уменьшению коэффициента диффузии катионов радионуклидов через иллит.

Исследования выполнялись в рамках гранта РФФИ 16-08-0024616.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matusiewicz, M., Olin, M. Comparison of microstructural features of three compacted and water-saturated swelling clays: MX-80 bentonite and Na- and Ca-purified bentonite // Clay Minerals, 54(1), 75-81, 2019.
2. Leng Ya., Henderson M.J., Courtois J. at all. Sorption of plutonium on geological materials associated with a Chinese radioactive waste repository: influence of pH // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2016. – V. 308. – P. 895–903.

### ЛАЗЕРНАЯ ДЕЗАКТИВАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЭЛОВ

В.А. Хан<sup>1</sup>, В.Ф. Мышкин<sup>1</sup>, Д.М. Хорохорин<sup>1,2</sup>, М.С. Кузнецов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

<sup>2</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат»,

Россия, г. Железногорск, ул. Ленина, 53, 662972

E-mail: [dmh1@tpu.ru](mailto:dmh1@tpu.ru)

В настоящее время перспективны ядерные реакторы 4-го поколения, такие как быстрые натриевые, использующие мокс-топливо. Производство мокс-топлива имеет множество технологических особенностей и контрольных операций, не характерных для технологии топлива на основе  $UO_2$ .

Мокс-топливо содержит плутоний, который в  $\sim 180000$  раз активнее природного урана, претерпевающий в основном  $\alpha$ -распад. Поэтому попадание мельчайших частиц топлива на внешнюю поверхность трубки твэла, вносит большое  $\alpha$ -загрязнение. Поэтому при производстве твэлов с мокс-топливом требуется контроль поверхностного загрязнения  $\alpha$ -активными радионуклидами.

При загрузке трубки топливным столбом микрочастицы топлива могут попасть на торец трубки. При последующей приварке заглушки возможно попадание микрочастиц в сварной шов заглушки. Загрязнение твэла представляет из себя микрочастицы мокс-топлива находящиеся на поверхности трубки, а также включенные в объем сварочного шва заглушки твэла.

Известна технология дезактивации трубки твэла, включающая протирку поверхности твэла через тканевые чистящие элементы картриджа [патент РФ №2605540]. Однако, метод не обеспечивает удаление радиоактивных пылинок, частично утопленных в объем сварного шва заглушки твэла.

Для дезактивации сварного шва предлагается использовать лазерное испарение поверхности оболочки твэла. Задача исследования – оптимизация параметров лазерных импульсов, позволяющих максимально уменьшить активность сварного шва трубки твэла при минимальном увеличении шероховатости поверхности трубки.

Стальные сплавы и оксиды урана, плутония отличаются теплоемкостью, температурами плавления и кипения. Селективному испарению микрочастиц оксидов способствует их меньшая теплопроводность и высокий коэффициент поглощения лазерного излучения на рабочей длине волны. Металлы и оксиды металлов нагреваются с разной скоростью из-за того, что имеют разные показатели преломления и